

Для третьей ступени: $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $k = 1,4$; $P_1 = 363,4 \text{ кПа}$; $P_2 = 600 \text{ кПа}$; $T_1 = 273 \text{ К}$; $T_2 = 373 \text{ К}$.

$$L_{3,\text{антифриз}} = 42189 \text{ Дж.}$$

Общая работа компрессора, используя промежуточный охладитель – антифриз:

$$L_{\text{общ.антифриз}} = L_{1,\text{антифриз}} + L_{2,\text{антифриз}} + L_{3,\text{антифриз}} = \\ = 56365 + 59987 + 42189 = 158541 \text{ Дж.}$$

Найдем разницу в работе компрессорной установки на водяном охлаждении и на антифризе:

$$\Delta L = L_{\text{общ.водяного охлаждения}} - L_{\text{общ.антифриз}} = 172859 - 158541 = 14318 \text{ Дж.}$$

Найдем экономию использования охладителя-антифриза:

$$-\Delta E = \Delta L \cdot P = 14318 \cdot 1000 = 770308 \text{ Дж} \cdot \text{кг/с},$$

где P – производительность сжатого воздуха производства ОАО «Уральская сталь», $P = 53,8 \text{ кг/с}$.

Годовая экономия энергии будет равна:

$$-\Delta E_{\text{год}} = 770308 \cdot 86400 \cdot 365 = 24,3 \text{ ТДж} \cdot \text{кг/с},$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что такое решение может дать большой энергосберегающий эффект.

Список литературы

1. Калинин Н. В., Кабанова И. А., Галковский В. А., Костюченко В. М. Системы воздухообмена промышленных предприятий. Смоленск : Смоленский филиал МЭИ (ТУ), 2005. 122 с.
2. Чоджой М. Х. Энергосбережение в промышленности. М. : Металлургия, 1982. 272 с.
3. Баскаков А. П. Теплотехника. М. : Энергоатомиздат, 1991. 224 с.

УДК 621.313.8

Поздеев А. С., Казакбаев В. М., Прахт В. А., Дмитриевский В. А.
Уральский федеральный университет,
kazakbaiev@inbox.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

В условиях ориентации промышленности на энергосберегающие технологии все большее внимание уделяется энергоэффективным электроприводам. Одним из таких электроприводов является электропривод с использованием двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе (ДПМР).

В настоящее время разработано множество типов ДПМР и методов управления ими, при этом действующий в России ГОСТ 27471-87, определяющий типы подобных электрических машин, не охватывает имеющееся много-

образии ДППМ, и при изучении современной научной литературы, составлении патентов и научных публикаций, описывающих такие машины, а также при стандартизации параметров ДППМ двигателей, могут возникнуть существенные трудности.

Целью настоящей работы является систематизация современных типов ДППМ и обобщение способов управления этими двигателями.

По форме противоЭДС ДППМ разделяются на следующие типы [1]:

- Brushless Direct Current Motor (BLDC motor) – ДППМ, имеющий трапецеидальную форму противоЭДС. В отечественной литературе – бесконтактный двигатель постоянного тока;

- Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) – ДППМ, имеющий синусоидальную форму противоЭДС;

- BLDC двигатели, как правило, используются в высокоскоростных приложениях (при скоростях вращения в десятки тысяч оборотов в минуту) и низкоскоростных приложениях, не требовательных к пульсациям момента.

Разновидностью BLDC двигателей, имеющих меньшие пульсации момента, является slotless BLDC (slotless PM) motor. Slotless BLDC motor – это BLDC двигатель, статорная обмотка которого выполнена без пазов. Один из примеров использования такого двигателя описан в [2].

PMSM двигатели по способу установки магнитов в роторе разделяются на следующие типы [1, 3]:

- Surface mounted permanent magnet (SMPM или SPM) motor – PMSM двигатель, у которого постоянные магниты расположены на поверхности ротора;

- Interior mounted permanent magnet (IMPM или IPM) motor – PMSM двигатель, у которого постоянные магниты встроены в тело ротора.

- SMPM двигатели в сравнении с IMPM более технологичны в изготовлении, вследствие чего более распространены, сравнение этих типов двигателей приведено в [3].

Все способы управления BLDC и PMSM двигателями разделяются на датчиковые (sensored control) и бездатчиковые (sensorless control), способы управления PMSM двигателями, кроме того, разделяются на скалярные и векторные. При датчиковом управлении ориентация магнитного поля статора осуществляется по информации с датчиков положения ротора. При бездатчиковом управлении ориентация магнитного поля статора осуществляется по вычисленному положению ротора или положение ротора для ориентации поля не используется (скалярные способы управления).

В качестве датчиков положения ротора у BLDC двигателей, как правило, используются датчики Холла, формирующие сигнал положения ротора с дискретностью 60 электрических градусов. Для управления PMSM двигателями требуется большая дискретизация положения ротора, и поэтому используются различного рода энкодеры, резольверы, датчики Холла с линейным выходом и пр.

Управление BLDC двигателем обеспечивается таким образом, что каждому из шести положений ротора в полюсе двигателя соответствует шесть определенных комбинаций замкнутых ключей трехфазного моста, тем самым обеспечивается необходимый сдвиг вектора тока статора относительно вектора потока ротора.

При датчиковом управлении BLDC двигателем может использоваться 120– или 180–градусная коммутация ключей. При 120 градусной коммутации ключи открыты в течение 120 электрических градусов, т. е. в каждый момент времени замкнуто два ключа. При 180–градусной коммутации ключи открыты в течение 180 электрических градусов, т. е. в каждый момент времени замкнуто три ключа. Сравнение 120– и 180–градусной коммутации приведено в [4].

При бездатчиковом управлении BLDC двигателем используется 120–градусная коммутация и положение ротора определяется по противоЭДС, наводимой в свободной от коммутации фазе [5].

Скорость ротора BLDC двигателей регулируется за счет изменения действующего значения тока статорных обмоток с использованием двух способов. По первому способу регулирование тока осуществляют за счет широтно-импульсной модуляции ключей моста; по второму способу регулирование скорости осуществляется за счет регулирования напряжения звена постоянного тока дополнительным step-down преобразователем с синхронным выпрямлением. Второй способ, как правило, используется для двигателей со скоростями вращения ротора в сотни тысяч оборотов в минуту [6]. Следует отметить, что для подобных высокоскоростных приложений использование датчиков Холла является затруднительным из-за низкого их быстродействия, и зачастую бездатчиковые способы управления более эффективны и просты.

Скалярное управление PMSM двигателями аналогично скалярному управлению асинхронными двигателями – в зависимости от характеристики нагрузки обеспечивается необходимое соотношение амплитуды и частоты питающего напряжения, например, $U/f = \text{const}$.

Точность скалярного управления может быть существенно повышена за счет использования в контуре токов дополнительного компенсирующего сигнала, вычисленного в системе координат, вращающейся синхронно с оцениваемым положением ротора. Данный метод при своей простоте обеспечивает точность, конкурирующую с точностью при векторном управлении [7].

При векторном управлении PMSM общим для всех способов является наличие замкнутого по положению ротора контура формирования статорных напряжений и токов.

Отличия режимов векторного управления заключаются в способе получения сигнала положения ротора. При датчиковом управлении сигнал положения ротора уже имеется в системе управления и ее синтез не представляет сложности. При бездатчиковом управлении используются следующие основные методы вычисления положения ротора:

- вычисление положения ротора по углу вектора противоЭДС, наводимой в статорных обмотках двигателя. Данный способ достаточно простой и эффективный, но может использоваться для ограниченного диапазона скоро-

стей из-за сложности детектирования противоЭДС на малых скоростях. Способ может использоваться для SMPM и IMPM двигателей. Вариацией данного способа является вычисление угла ротора по углу вектора потока ротора, однако этот способ сложнее при той же точности [1];

- вычисление положения ротора по изменению индуктивности обмоток статора в осях d и q . Данный способ обеспечивает большую, чем описанный выше метод, точность, но требует калибровки двигателя и преобразователя частоты для определения зависимости индуктивности обмоток от положения ротора в полюсе двигателя. Метод использует для вычисления мгновенные значения вычисленных противо-ЭДС и так же, как предыдущий метод, может использоваться в ограниченном диапазоне скоростей. Использование этого метода более эффективно для IMPM двигателей [1];

- вычисление положения ротора с использованием инъекции высокочастотного сигнала в сигнал задания по напряжению статора. Этот метод, как и предыдущий, основан на изменении индуктивности обмоток статора в осях d и q , что вызывает различный отклик инжектированного сигнала по указанным осям. Этот метод является самым точным среди бездатчиковых методов, так как обеспечивается управление двигателем во всем диапазоне скоростей, в том числе при работе электропривода «на упор» при нулевой скорости. Недостатком данного метода является необходимость реализации сложных алгоритмов фильтрации (как правило, используется фильтр Калмана) и калибровки двигателя и преобразователя частоты аналогично предыдущему методу. Использование этого метода более эффективно для IMPM двигателей [1; 8].

Существенным недостатком методов, использующих вычисление противоЭДС, является зависимость точности вычисления положения ротора от точности используемого в расчетах значения активного сопротивления ротора и индуктивности обмоток статора, которые при нагреве двигателя существенно изменяются. Методы компенсации изменения активного сопротивления и индуктивности обмоток статора приведены в [9; 10].

Экспериментальное сравнение описанных методов управления PMSM двигателями приведено в [1].

Несмотря на имеющееся многообразие типов ДПМР и способов управления ими, они продолжают бурно развиваться, что обусловлено ориентацией промышленности и народного хозяйства на энергосберегающие технологии и расширением спектра применения ДПМР.

Список литературы

1. Zhao Yue. Position/speed sensorless control for permanent-magnet synchronous machines // Electrical Engineering Theses and Dissertations. Paper 51. 2014.
2. Nicola Bianchi. High Speed Drive Using a Slotless PM Motor // IEEE Transactions on power electronics. July 2006. Vol. 21. № 4.
3. Vagati A., Pellegrino G., Guglielmi P. Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application [Электронный ресурс]. // XIX International Conference on Electrical Machines ICEM. 2010. Rome (дата обращения: 05.11.2014).

4. Воронин С. Г., Курносков Д. А., Кульмухаметова А. С. Сравнительная оценка различных способов управления коммутацией вентильных двигателей по энергетическим показателям и энергетическим свойствам // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13, № 1.
5. Jianwen Shao. Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC). Blacksburg, Virginia : Virginia Polytechnic Institute, 2003.
6. Christof Zwyssig, Johann W. Kolar, Simon D. Round. Megasppeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min // IEEE/ASME Transactions on mechatronics. October 2009. Vol. 14, № 5.
7. Jun-ichi Itoh, Naofumi Nomura, Hiroshi Ohsawa. A Comparison between V/f Control and Position-Sensorless Vector Control for the Permanent Magnet Synchronous Motor. Osaka : PCC-Osaka, 2002.
8. Sensorless PMSM Drive With DC-Link Current Measurement / Piippo A., Suomela K., Hinkkanen M. and Luomi J. // Conference Record of the 42nd IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting. New Orleans, 2007. P. 2371–2377.
9. Performance Improvement of a PMSM Sensorless Control Algorithm Using a Stator Resistance Error Compensator in the Low Speed Region / Nung-Seo Park, Min-Ho Jang, Jee-Sang Lee, Keum-Shik Hong and Jang-Mok Kim // Journal of Power Electronics. September 2010. Vol. 10. № 5. P. 477–484.
10. Investigation of PMSM Back-EMF using Sensorless Control with Parameter Variations and Measurement Errors / Zihui Wang, Qinfen Lu, Yunyue Ye, Kaiyuan Lu, Youtong Fang. // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review). 2012. NR 8. P. 88.

УДК 621.3

Покрышкин Б. А., Ковалев А. А.
Уральский государственный университет путей сообщения
boryani4@mail.ru, AKovalev@usurt.ru

ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Контактная сеть является подсистемой сложной технической системы – электрический транспорт. Одна из главных функций контактной сети – распределение и подвод электрической энергии к электроподвижному составу посредством контакта с токоприемником. Токосъем осуществляется в динамической системе контактная подвеска–токоприемник. Обеспечение качественного токосъема является важной задачей для устойчивой работы транспорта.

К конструкции контактной сети предъявляются повышенные требования надежности, так как на нее воздействуют токовые (тяговые), механические и климатические нагрузки. Контактная сеть обязана обеспечить бесперебойную эксплуатацию при огромном количестве последовательно соединенных узлов. Переход любого из этих узлов в предельное состояние (разрушение, потеря несущей способности или устойчивости, недопустимые деформации) приводит к отказу всей системы, а соответственно и к перерыву движения поездов.

Проектирование деталей контактной сети занимает много времени и требует большой точности расчетов. Сегодня, чтобы испытывать их на прочность, необходимо выполнять множество вычислений, прибегая к немалому количеству допущений.